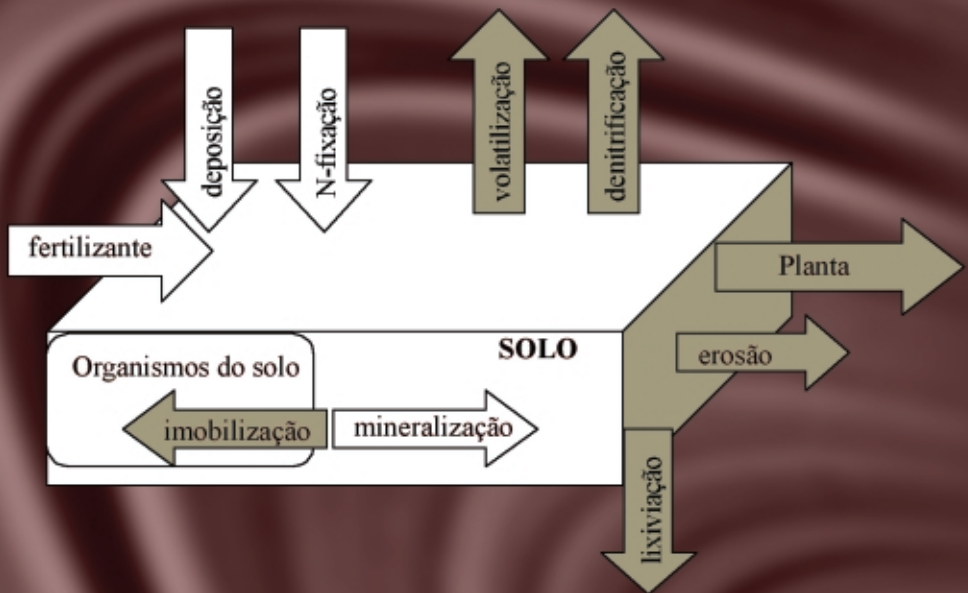


Modelo de Balanço de Nitrogênio para Cana-de-Açúcar: Fase I – Análise Teórica e Ajustes



República Federativa do Brasil

Fernando Henrique Cardoso
Presidente

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Marcus Vinicius Pratini de Moraes
Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa

Conselho de Administração

Márcio Fortes de Almeida
Presidente

Alberto Duque Portugal
Vice-Presidente

Dietrich Gerhard Quast
José Honório Accarini
Sérgio Fausto
Urbano Campos Ribeiro
Membros

Diretoria Executiva da Embrapa

Alberto Duque Portugal
Diretor-Presidente

Bonifácio Hideyuki Nakasu
Dante Daniel Giacomelli Scolari
José Roberto Rodrigues Peres
Diretores-Executivos

Embrapa Informática Agropecuária

José Gilberto Jardine
Chefe-Geral

Tércia Zavaglia Torres
Chefe-Adjunto de Administração

Kleber Xavier Sampaio de Souza
Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

Álvaro Seixas Neto
Supervisor da Área de Comunicação e Negócios

Relatório Técnico 13

Modelo de Balanço de Nitrogênio para Cana-de-Açúcar: Fase I – Análise Teórica e Ajustes

Alessandra Fabíola Bergamasco
Fábio Cesar da Silva
Luiz Henrique Antunes Rodrigues
Paulo Cesar Ocheuze Trivelin

Embrapa Informática Agropecuária
Área de Comunicação e Negócios (ACN)

Av. Dr. André Tosello s/nº
Cidade Universitária "Zeferino Vaz" – Barão Geraldo
Caixa Postal 6041
13083-970 – Campinas, SP
Telefone/Fax: (19) 3789-5743
URL: <http://www.cnptia.embrapa.br>
Email: sac@cnptia.embrapa.br

Comitê de Publicações

Amarindo Fausto Soares
Francisco Xavier Hemerly (Presidente)
Ivanilde Dispatto
José Ruy Porto de Carvalho
Marcia Izabel Fugisawa Souza
Suzilei Almeida Carneiro

Suplentes

Fábio Cesar da Silva
João Francisco Gonçalves Antunes
Luciana Alvin Santos Romani
Maria Angélica de Andrade Leite
Moacir Pedroso Júnior

Supervisor editorial: *Ivanilde Dispatto*
Normalização bibliográfica: *Marcia Izabel Fugisawa Souza*
Capa: *Intermídia Publicações Científicas*
Editoração eletrônica: *Intermídia Publicações Científicas*

1ª edição

Todos os direitos reservados

Modelo de balanço de nitrogênio para cana-de-açúcar : fase I – análise teórica e ajustes / Alessandra Fabíola Bergamasco...[et al.] — Campinas : Embrapa Informática, 2001.
33 p. : il. — (Relatório técnico / Embrapa Informática Agropecuária ; 13)

ISSN 1517-0330

1. Modelo matemático. 2. Cana-de-açúcar. 3. Adubação nitrogenada. I. Bergamasco, Alessandra Fabíola. II. Série.

CDD – 630.2118 (21.ed.)

© Embrapa 2001

Sumário

Resumo	5
Abstract.....	7
Introdução	9
Material e Métodos	12
Resultados e Discussão	15
Estudo dos Processos que o Nitrogênio Sofre no Solo ...	15
Fluxograma com as Sub-rotinas do Modelo CERES	18
Equações do Modelo CERES N	21
Modelo Teórico Preliminar de Balanço de Nitrogênio para a Cana-de-Açúcar	27
Conclusões	31
Referências Bibliográficas	32

Modelo de Balanço de Nitrogênio para Cana-de-Açúcar: Fase I – Análise Teórica e Ajustes

Alessandra Fabíola Bergamasco¹

Fábio Cesar da Silva²

Luiz Henrique Antunes Rodrigues³

Paulo Cesar Ocheuze Trivelin⁴

Resumo

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), sendo que a queima da palha do canavial visando facilitar a colheita ainda é muito praticada. Essa prática vem sendo questionada pela alta emissão de gases, além de provocar perdas de nutrientes para as plantas, facilitar o aparecimento de ervas daninhas e erosão. As maiores limitações à produtividade da cana-de-açúcar, estão relacionados à disponibilidade de quantidades adequadas de nutrientes minerais nos solos, com destaque ao nitrogênio (N), mas, sem a queima prévia da cana, a cobertura pela palhada irá provocar mudanças no manejo da cultura e na dinâmica do N. O uso da modelagem matemática reduz a necessidade de

¹ Zootecnista, Bolsista CNPq, Embrapa Informática Agropecuária, Caixa Postal 6041, Barão Geraldo – 13083-970 – Campinas, SP. (E-mail: afb@cnptia.embrapa.br)

² Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária. (E-mail: fcesar@cnptia.embrapa.br)

³ Doutor em Engenharia Agrícola, Prof. da Feagri/Unicamp, Cidade Universitária "Zeferino Vaz", Caixa Postal 6011 – 13083-970 – Campinas, SP. (E-mail: lique@agr.unicamp.br)

⁴ Doutor em Agronomia, Prof. Livre-Docente do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), Caixa Postal 96 – 13400-970 – Piracicaba, SP. (E-mail: pcotrive@cena.usp.br)

experimentos e facilita a sistematização de conhecimentos sobre esse tema. O modelo CANEGRO, do software DSSAT, é usado para simular o crescimento e o rendimento da cana-de-açúcar. Entretanto, esse modelo é recente na literatura internacional, e não possui um módulo que execute o balanço de N. Assim, este estudo objetivou, nesta primeira fase, a construção de um modelo teórico preliminar, descrevendo toda a dinâmica do N no sistema solo – cana-de-açúcar, considerando uma camada de palhada no solo, através da adaptação do modelo CERES N. Na próxima fase (Fase II), esse modelo, com as equações inseridas, será reconstruído no software de simulação STELLA, e será calibrado o modelo preliminar de balanço de nitrogênio para a cana-de-açúcar através de dados de experimentos com N marcado com cana-de-açúcar colhida sem queima, fornecidos pelo Dr. Paulo Cesar O. Trivelin do CENA/USP. Como última etapa, esse modelo será validado com dados de experimento de campo, e inserido no software DSSAT como sub-rotina do modelo CANEGRO.

Termos para indexação: Simulação; Crescimento; Nitrogênio.

Nitrogen Balance Model for Sugarcane: Phase I – Theoretical Analysis and Fit

Abstract

Brazil is the largest world-producer of sugarcane (*Saccharum spp.*), and the burning of the straw of the sugar cane plantation, seeking to facilitate the harvest, it is still very practiced. This practice has been questioned by the high emission of gases, besides provoking losses of nutrients for the plants, to facilitate the emergence of weeds and erosion. The largest limitations to the productivity of the sugarcane, are related the availability of adequate amounts of mineral nutrients in the soil, with prominence to nitrogen (N), but, without the previous burning of the sugar cane, the covering for the palhada will provoke changes in the handling of the culture and in the dynamics of N. The use of the mathematical Modeling reduces the need of experiments and it facilitates the systematization of knowledge on that subject. CANEGRO Model, of software DSSAT is used to simulate the growth and the income of the sugarcane. However, that model is recent in the international literature, and it does not possess a module to execute the swinging of N. Thus, this study objectified, in this 1st phase, the construction of a preliminary theoretical Model, describing all the N dynamics in the solar system - sugarcane, considering the palhada layer of in the ground, through the adaptation of CERES N model.

In the next phase (Phase II), that model, with the inserted equations, it will be reconstructed in the simulation software STELLA, and will be calibrated the preliminary N model swinging for the sugarcane data of experiments with N marked with sugar cane harvested without burning, supplied by Dr. Paulo Cesar O. Trivelin. As last stage, this model will be validated with data of experimental field, and inserted in the software DSSAT as subroutine of the CANEGRO model.

Index terms: Simulation; Growth; Nitrogen.

Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), atingindo uma área total cultivada que ultrapassa 4,2 milhões de hectares, com uma produção anual da ordem de 287 milhões de toneladas (cana colhida); mais da metade desse total é cultivada no Estado de São Paulo, onde se sobressai a região Norte (Matioli et al., 1998).

Com relação ao meio ambiente, por ser uma das culturas de maior capacidade em fixar o gás carbônico (CO_2), retira mais carbono da atmosfera do que retorna através da combustão do álcool, reduzindo a poluição ambiental. Uma característica muito especial da cana-de-açúcar é que, a despeito da grande quantidade de nitrogênio extraído do solo para o seu crescimento e produção, muitas regiões canavieiras do Brasil praticamente não utilizam fertilizantes nitrogenados (N-fertilizantes).

A queima da palha do canavial visando facilitar a colheita ainda é muito praticada no Brasil. Esta prática vem sendo questionada pela alta emissão de CO_2 (gás carbônico) e gases de nitrogênio e enxofre (responsáveis pelas chuvas ácidas), além de provocar perdas significativas de nutrientes para as plantas e facilitar o aparecimento de ervas daninhas e a erosão, devido à redução da proteção do solo. De acordo com o decreto estadual de São Paulo nº. 42056, de 06 de agosto de 1997, a queima da cana foi proibida e foram estabelecidos prazos limites para eliminação das queimadas dos canaviais paulistas.

Com a prática do estabelecido neste decreto, além da eliminação da poluição do ar, a manutenção da palha da cana no campo, após o corte, permite a conservação da umidade, temperatura e um acúmulo de matéria orgânica no solo, condições ideais para o desenvolvimento da planta e da população de microrganismos associados ao sistema (Urquiaga et al., 1991); além disso, elimina as emissões de CO_2 e a fuligem causada pela queima dos canaviais (Magro, 1998); reduz o cultivo mecânico pós-colheita, operação essa que atualmente é restrita a áreas com compactação do solo; aumenta o teor de matéria orgânica; aumenta a quantidade de N e outros nutrientes no solo; eleva a capacidade de troca catiônica e aniônica do solo; melhora a estrutura dos solos; reduz as per-

das de solo por erosão; facilita a infiltração de água; conserva a água no solo e diminui a amplitude de variação da umidade; aumenta a disponibilidade de água para as culturas (Cantarella, 1998; Torres & Villegas, 1996; Wood, 1991; Ng Kee Kwong et al., 1987; Yadav et al., 1987).

As maiores limitações do meio à produtividade da cana-de-açúcar, nas regiões canavieiras do Brasil, não se relacionam à radiação solar, à temperatura e, nem mesmo, à água, mas à disponibilidade de quantidades adequadas de nutrientes minerais nos solos, com destaque ao nitrogênio (Trivelin, 2000). Pouco conhecimento tem-se a respeito das práticas de manejo que deverão ser adotadas nos canaviais sem a queima do palhicho, e as usinas e os produtores precisam de soluções quanto a localização de N-fertilizante, melhores dosagens de N para soqueiras (as recomendações existentes prestam-se ao manejo convencional com queima), melhor fonte de N com menor perda por volatilização da amônia, etc.

A cobertura do solo pela palhada, como já comentado, irá provocar significativas mudanças no manejo da cultura e na dinâmica do N, com influência direta nas práticas de adubação de soqueiras, principalmente em relação à condução e dose econômica da fertilização nitrogenada, uma vez que o N é o nutriente que mais limita a produtividade dos canaviais. Além disso, é difícil a operação de cultivo com a palhada remanescente.

Entretanto, a busca de novos conhecimentos através do uso da experimentação agrícola convencional implica na instalação de um número elevado de ensaios e um tempo grande para acumular o conhecimento sobre o tema. Tal conhecimento gerado pela pesquisa pode ser aplicado de forma generalizada na cultura de cana-de-açúcar utilizando-se a técnica de simulação em sistema, reduzindo-se drasticamente a necessidade de experimentos e facilitando a sistematização desse conhecimento sobre esse tema (Penning de Vries, 1982).

Uma das maneiras para que isso aconteça é o uso de modelagem matemática para descrever quantitativamente esse sistema. Após modelado, os sistemas são dispostos em software que podem ser utilizados. No caso da cana, o modelo CANEGRO é o que mais freqüentemente vem sendo usado nos trabalhos publicados na literatura internacional em cana-de-açúcar (Seligman & Keulen, 1981; Craswell & Godwin, 1984; Inman-Bamber, 1991; Godwin & Singh, 1998), os quais baseiam-se no balanço

do carbono, que depende da interceptação e utilização da luz, e um balanço de água, que depende da demanda atmosférica e da utilização da água do solo (Penning de Vries, 1982). Agregando-se estes conhecimentos através de equações matemáticas, resultam modelos que podem simular o crescimento e o rendimento das culturas (Penning de Vries, 1982).

Entretanto, esse processo de modelagem do crescimento da cultura de cana é gradual e lenta, pois depende do avanço do conhecimento no tema. O atual modelo CANEGRO é recente na literatura internacional, e não possui um módulo que execute o balanço de N para cana-de-açúcar, embora existam estudos parciais elaborados pela equipe do “International Consortium for Agricultural Systems Applications” – ICASA, para implantá-lo (International CANEGRO Workshop em Durban, África do Sul). A proposta desse projeto integra-se ao esforço de cooperação internacional desse consórcio - ICASA, para implementar o balanço do N no modelo CANEGRO, utilizando-se para isso a marcação isotópica (^{15}N) e o modelo CERES N do software DSSAT (Tsuji et al., 1994).

O modelo CERES N (Modelo de Balanço de Nitrogênio do CERES para milho, trigo, arroz, sorgo, cevada e milheto), simula a dinâmica da matéria orgânica no solo e a transformação de resíduos de cultura com associação da mineralização e/ou imobilização (incorporação do N na biomassa microbiana como parte da matéria orgânica do solo) do nitrogênio. O modelo estima também a nitrificação da amônia e perdas de N associados com a denitrificação (por microrganismos em condições anaeróbias). Esse modelo incorpora um componente de N o qual simula o N absorvido e sua distribuição dentro da planta e remobilização durante o enchimento de grãos e resposta de crescimento para a sua posição na planta (Godwin & Singh, 1998).

O objetivo deste estudo é, através da ferramenta de modelagem matemática, agregar o conhecimento existente para ajudar a responder questões na otimização do manejo do nitrogênio, gerando discussões e mostrando resultados a partir de simulações. Os modelos de dinâmica de nitrogênio podem servir como um sistema de orientação na recomendação de N-fertilizante em diferentes condições através da criação de cenários e orientação no manejo adequado de canaviais, visando obter a máxima produtividade da cultura, e melhor alocação de recursos varietais e de insumos.

Nesta primeira fase do estudo (Fase I), objetivou-se a construção de um modelo teórico preliminar que descreve toda a dinâmica do nitrogênio no sistema solo – cana-de-açúcar, considerando uma camada de palhada no solo, através da adaptação do modelo CERES N. Foi também inserido, neste modelo preliminar, as equações referentes a cada processo que ocorre neste sistema. Na próxima fase (Fase II), esse modelo, com as equações inseridas, será reconstruído no software de simulação STELLA, e será calibrado através de dados de 6 experimentos com nitrogênio marcado (^{15}N) com cana-de-açúcar colhida sem queima prévia, fornecidos pelo Dr. Paulo Cesar O. Trivelin do CENA/USP. Posteriormente (Fase III), esse modelo será validado com dados do experimento de campo que está sendo instalado sob responsabilidade do Dr. Fábio Cesar da Silva, em área da Usina Costa Pinto. Após validado esse modelo de balanço de nitrogênio para a cana-de-açúcar será introduzido como uma sub-rotina no modelo CANEGRO, como parte do software de simulação DSSAT (Tsuji et al., 1994).

Material e Métodos

Foi utilizado, neste estudo, o Modelo CERES de Balanço de Nitrogênio para gramíneas, o CERES N (Fig. 1), o qual está intimamente ligado com os componentes água e crescimento, que, para a cultura da cana-de-açúcar, se encontram no Modelo CANEGRO (Fig. 2).

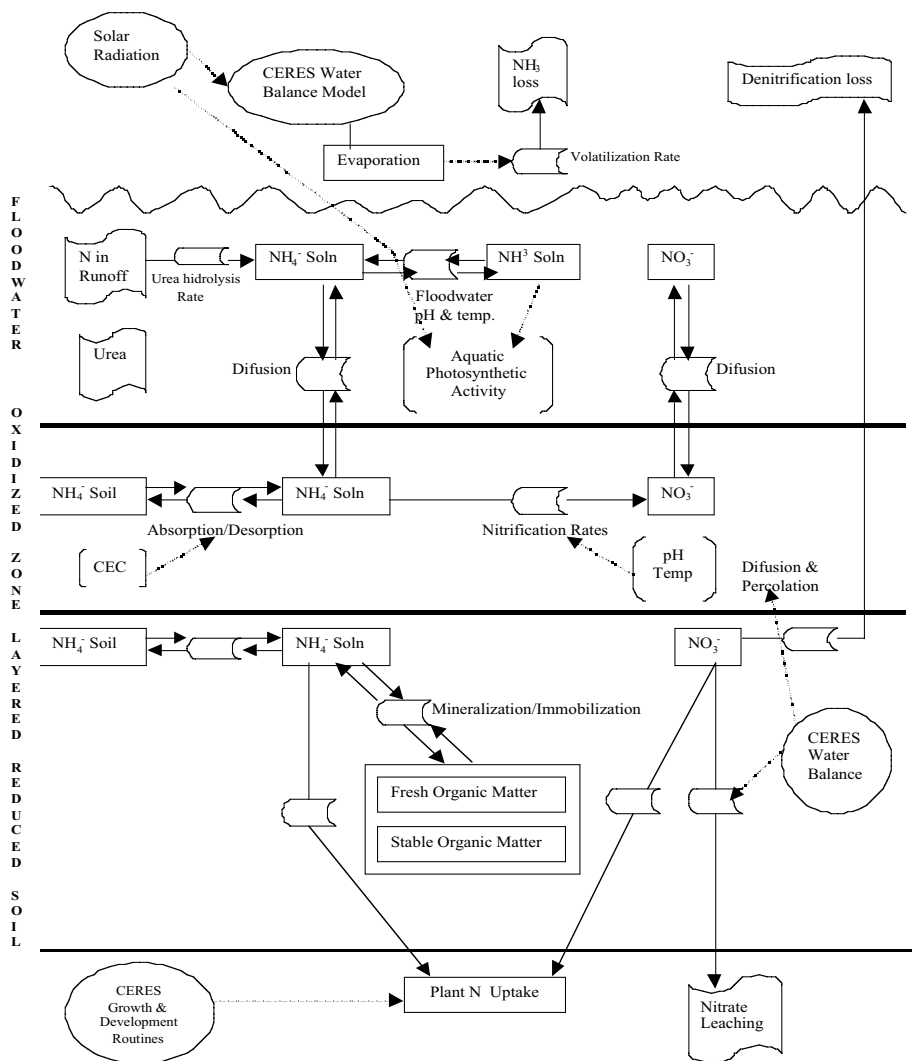


Fig. 1. Diagrama do Modelo CERES de Balanço de N para cultura de arroz inundado.

Fonte: Godwin & Singh (1998).

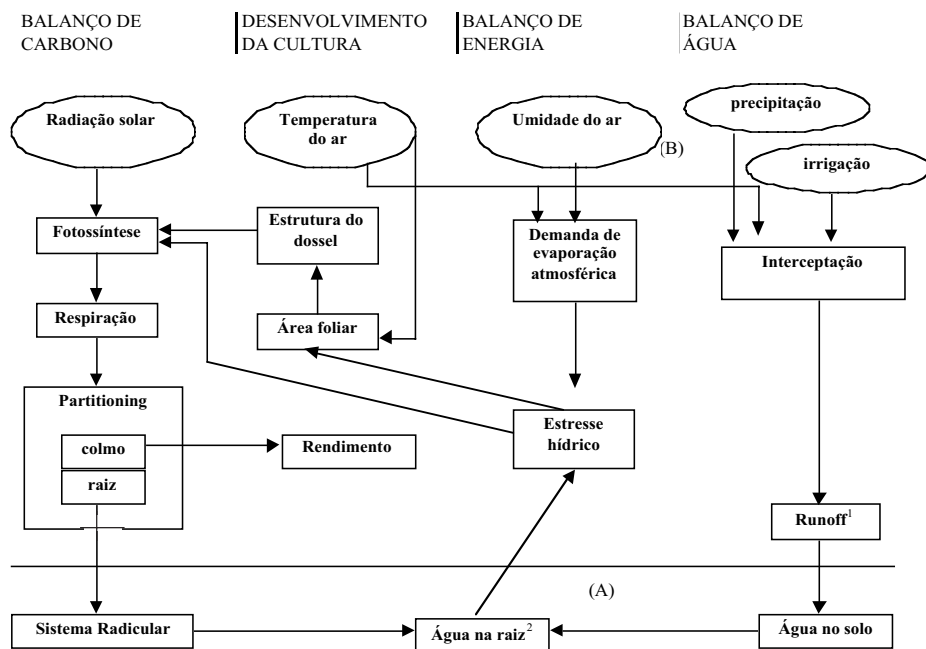


Fig. 2. Fluxograma do modelo CANEGRO.

Fonte: Inman-Bamber (1991).

Os passos para construção do modelo de balanço de nitrogênio para a cultura da cana-de-açúcar foram os seguintes:

1. o primeiro passo para a modelagem matemática foi o estudo e identificação dos processos que o nitrogênio sofre no solo, para poder entender o modelo e adaptá-lo a cultura da cana-de-açúcar, conforme pode ser observado na Fig. 3;
2. posteriormente foi realizado um estudo do modelo CERES completo para organização das sub-rotinas e construção de um fluxograma que descreva todo o funcionamento desse modelo dentro do software DSSAT (Fig. 4). Essas sub-rotinas foram identificadas através do código fonte do DSSAT em linguagem FORTRAN;

3. depois foram retiradas, desse código fonte em FORTRAN, as equações que faziam parte da rotina de Balanço de Nitrogênio (CERES N);
4. foi, então, realizado um estudo detalhado de cada equação do Modelo CERES de Balanço de Nitrogênio, para identificação das variáveis e dos parâmetros que necessitavam ser alterados para adaptá-lo a outra cultura e aqueles que deveriam ser modificados de acordo com as condições edafoclimáticas em várias regiões brasileiras;
5. foi construído um fluxograma para descrever a dinâmica do N no sistema solo-cana-de-açúcar (Fig. 5), através da adaptação do Modelo CERES N (Fig. 1), descrito para a cultura do arroz irrigado, excluindo os processos não relevantes na dinâmica de N.

Para isso, foi utilizado como base o fluxograma do Modelo CERES N para culturas irrigadas, conforme pode ser observado na Fig. 1, transformando-se a camada de água da superfície (Floodwater) em uma camada de palhada, a qual alterará os processos de transformação do N; além disso foram ajustados novos parâmetros específicos à cultura da cana-de-açúcar, e foi retirada a parte do modelo de enchimento de grãos e incluído o transporte de N para o caldo da cana-de-açúcar.

6. Por fim, foi construído um modelo teórico preliminar, contendo as equações do modelo de Balanço de Nitrogênio em cada compartimento do modelo, o qual será, na próxima Fase deste estudo (Fase II), reconstruído no software STELLA para realizar simulações e ser analisado para posterior validação e inserção como uma sub-rotina no modelo de crescimento da cana-de-açúcar CANEGRO (Fig. 2).

Resultados e Discussão

Estudo dos Processos que o Nitrogênio Sofre no Solo

A Fig. 3 a seguir, esquematiza os processos pelos quais o nitrogênio pode passar quando incorporado ao solo. Esses processos podem ocorrer em maior ou menor intensidade de acordo com interferências climáticas, da composição do fertilizante e do solo, e do manejo da cultura e do solo, e afetam diretamente a absorção do N pela cultura, interferindo assim no

crescimento e produção desta. Assim, o modelo matemático deve conter equações que quantifiquem esses processos, incluindo variáveis de interferência dentro dessas equações para produzir resultados de crescimento da cultura realmente confiáveis.

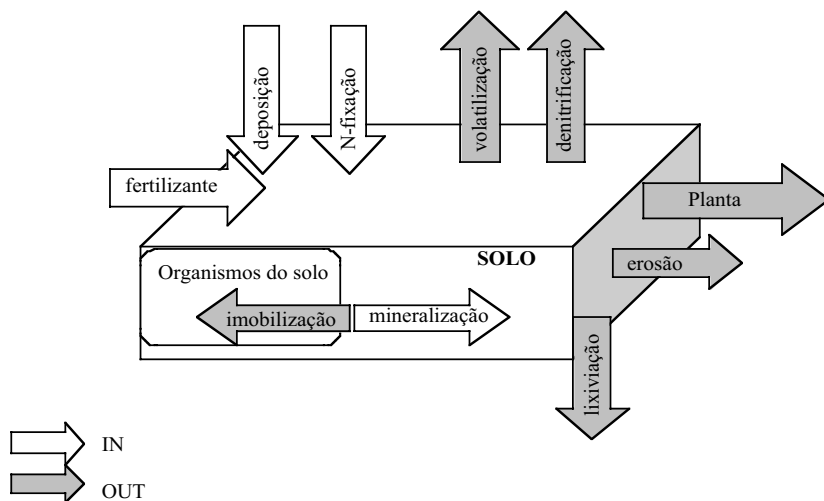


Fig. 3. Esquema dos processos de ganho (IN) e perda (OUT) de nitrogênio na avaliação da produção da cultura de cana-de-açúcar

Estudando-se o modelo CERES N, conclui-se que este modelo possui sub-rotinas para o cálculo de cada transformação sofrida pelo nitrogênio quando esse é incorporado ao sistema. No cálculo da mineralização, que se refere a deterioração dos resíduos de culturas e matéria orgânica no solo liberando N mineral, que é absorvido pelas plantas, é determinado o parâmetro de movimento da fração húmica no solo, que é dependente do N contido dentro desse húmus e decaimento da matéria orgânica, mas esse procedimento não pode ser aplicado universalmente para todos os tipos de solo, precisando de um fator de modificação. Para cálculo da mineralização e imobilização (passagem do N inorgânico para N orgânico) foi utilizado a aproximação descrita por Seligman & Keulen (1981).

Para estudo da nitrificação, que é o processo de oxidação de amônia para nitrato em condições anaeróbicas, facilitado por várias espécies de organismos nitrificadores, primeiro foi feito o cálculo do fator de concentra-

ção da amônia no solo, capacidade de nitrificação e o potencial de nitrificação relativo para o dia. A partir desses parâmetros chegou-se ao Índice de Nitrificação Diária, que é uma função de Michaelis-Mentem, dependente da concentração de amônia, temperatura e umidade do solo, água e populações nitrificadoras.

Outra sub-rotina do modelo CERES de balanço de N é para o cálculo da denitrificação. Organismos denitrificadores requerem uma fonte de energia e esta é geralmente derivada do carbono do solo. No modelo do DSSAT, uma estimativa da solubilidade do carbono do solo é feita usando um procedimento de modificação de Rolston et al. (1980), dependente da fração de carboidrato da matéria orgânica da camada do solo. Calcula-se também o fator água e o fator temperatura atuando neste parâmetro, chegando-se ao Índice de Denitrificação.

Nos modelos de culturas do DSSAT, somente o nitrato e a uréia são capazes de mover-se através das camadas e o movimento da amônia não é considerado. Os mesmos procedimentos são utilizados para a simulação de ambos os movimentos, uréia e nitrato, sendo que o movimento de nitrato no solo possui alta dependência com o movimento de água. A rotina de balanço de água calcula o volume movendo-se através de cada camada do perfil. O volume de água presente em cada camada e a água escoada de cada camada no perfil são usados para calcular a perda de nitrato. Uma fração da massa de nitrato presente em cada camada, move-se com cada escoamento, sendo como uma cascata, onde a perda de nitrato de uma camada é adicionada na camada de baixo. Quando a concentração de nitrato na camada está abaixo de $1 \mu\text{g NO}_3 (\text{g}^{-1} \text{ do solo})$, então não ocorre nova lixiviação.

Ainda existem sub-rotinas para cálculo de volatilização da amônia e difusão de nitrato, amônia e uréia entre o solo e a água. Calculou-se o equilíbrio entre $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ e $\text{NH}_3 - \text{N}$, através dos procedimentos descritos por Denmead et al. (1977), de acordo com os fatores pH e temperatura.

Os cálculos de absorção de N no tecido vegetal da planta, baseiam-se nas concentrações críticas de N, menor concentração na qual o crescimento é máximo, e nas concentrações mínimas, abaixo da qual o crescimento cessa. Se a concentração de N no tecido cai abaixo da concentração crítica, o processo de crescimento é afetado, mas se a concentração

de N se eleva acima desta, não há um crescimento adicional. Todos os processos de crescimento da planta são afetados igualmente pelo estresse de N. Nos modelos de culturas do DSSAT, a absorção de N pela planta é simulado pelo exame do fornecimento potencial de N para a cultura, do solo, e a capacidade ou demanda da planta por N.

Fluxograma com as Sub-rotinas do Modelo CERES

Pode-se observar na Fig. 4, a descrição das sub-rotinas do Modelo completo CERES, conforme está inserido no software de simulação DSSAT, em linguagem Fortran. Através desse Fluxograma podem ser melhor visualizadas as sub-rotinas referentes ao balanço de nitrogênio, de onde foram retiradas as equações para a identificação do modelo CERES N.

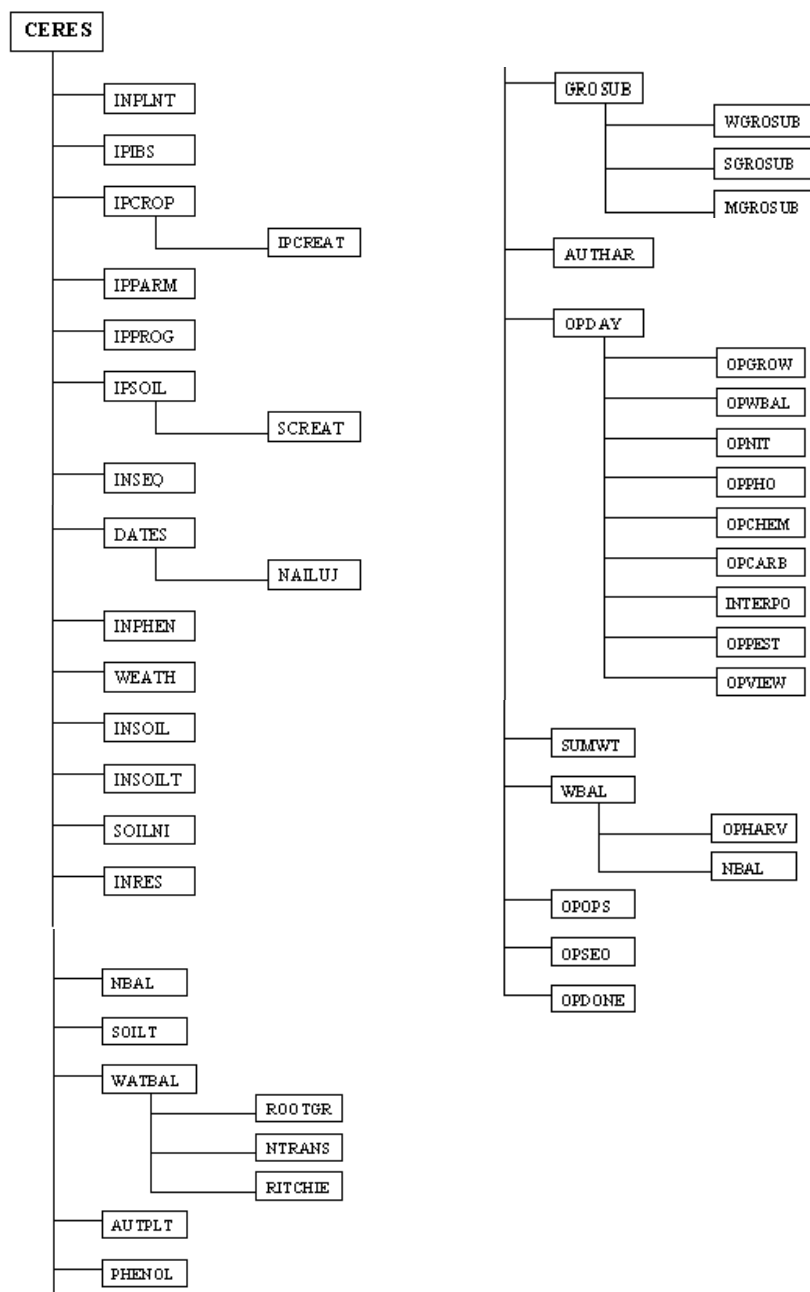


Fig. 4. Fluxograma do Modelo CERES.

Definições das sub-rotinas:

INPLNT	Determina programas de inicialização
IPIBS	Determina seleção de experimentos e tratamentos
IPCROP	Lê parâmetros da cultura
IPCREAT	Faz arquivo dos parâmetros das culturas
IPPARM	Lê o coeficiente de danos por pragas
IPPROG	Lê observações de pragas em uma série de tempo para o experimento que está sendo simulado
IPSOIL	Lê parâmetros de solo do SOIL.PAR
SCREAT	Faz arquivos de parâmetros de solo (SOIL.PAR)
INSEQ	Dados de entrada temporários para sequenciamento e rotação de cultura
DATES	Gera funções relacionadas ao tempo e dados calculados
NAILUJ	Determina o dia Juliano
INPHEN	Inicialização da fenologia
WEATHR	Rotinas para lidar com o clima
INSOIL	Inicialização do solo
INSOILT	Sub-rotina para calcular temperatura inicial do solo de cada camada
SOILNI	Sub-rotina para calcular as condições de N de cada camada do solo
INRES	Determina alocação dos resíduos orgânicos iniciais
NBAL	Determina o balanço de nitrogênio
SOILT	Calcula a temperatura do solo em cada camada
WATBAL	Calcula os componentes de Balanço de Água
ROOTGR	Determina o crescimento da raiz
NTRANS	Determina a transformação do nitrogênio
RITCHIE	Calcula componentes de Balanço de Água
AUTPLT	Determina a data do plantio
PHENOL	Determina o estágio fenológico
GROSUB	Sub-rotina de crescimento
WGROSUB	Sub-rotina de crescimento do trigo e cevada
SGROSUB	Sub-rotina de crescimento do sorgo
MGROSUB	Sub-rotina de crescimento do milho e milheto
AUTHAR	Sub-rotina para checar a colheita (determina quando ocorre a colheita)

OPDAY	Gera saídas para os dados simulados
OPGROW	Cria saídas para os dados de crescimento
OPWBAL	Cria arquivos de saída para balanço de água
OPNIT	Cria arquivos de saída para dados de nitrogênio
OPPHO	Cria arquivos de saída para dados de fósforo
OPCHEM	Cria arquivos de saída para dados químicos
OPCARB	Cria arquivos de saída para balanço de carbono
INTERPO	Interpolação entre camadas
OPPEST	Escreve dados de pragas e doenças em um arquivo
OPVIEW	Cria estágios específicos de saída
SUMWTH	Gera um resumo de saída para as variáveis de clima, como uma função das fases de crescimento críticas
WBAL	Providencia as saídas de balanço de água
OPHARV	Escreve o relatório de colheita
OPOPS	Cria operações de campo para arquivos de saída
OPSEQ	Escreve variáveis em um arquivo temporário para rodar a próxima seqüência
OPDONE	Fecha todos os arquivos abertos

Equações do Modelo CERES N

Através do código fonte do modelo CERES foi possível a determinação de cada processo envolvido na sub-rotina CERES N de balanço de nitrogênio, e determinação de cada equação matemática envolvida nesses processos, conforme descritos a seguir.

Mineralização da Matéria Orgânica Fresca (FOM)

Três pools compreendem o pool de FOM em cada camada L:

FPOOL (L,1) = carboidrato

FPOOL (L,2) = celulose

FPOOL (L,3) = lignina

1º cálculo: Fator Água (MF)

- a) Quando o solo é mais seco que o limite de dreno superior, MF é calculado assim:

$$\begin{aligned}AD &= LL(L) \times 0,5 \\ MF &= (SW(L) - AD(L)) / (DUL(L) - AD)\end{aligned}\tag{1}$$

Onde,

AD = conteúdo de umidade do ar

LL = limite inferior do conteúdo de água do solo

SW = conteúdo de água do solo

DUL = limite de dreno superior

MF = fator água

b) Quando o solo é mais úmido do que o limite de dreno superior, MF é:

$$MF = 1,0 - (SW(L) - DUL(L)) / (SAT(L) - DUL(L)) \times 0,5 \quad (2)$$

Onde,

SW = conteúdo de água do solo

DUL = limite de dreno superior

SAT = conteúdo de água de saturação

2º cálculo: Fator Temperatura (TF)

$$TF = (ST(L) - 0,5) / 30,0 \quad (3)$$

Onde,

TF = fator de unidade de temperatura

ST = temperatura do solo

3º cálculo: Efeito da composição do resíduo (CNR)

$$CNR = (0,4 \times FOM(L)) / (FON(L) + TOTN) \quad (4)$$

Onde,

CNR = efeito da composição do resíduo refletido pela relação C:N

FOM = matéria orgânica fresca

FON = movimento do N orgânico fresco

TOTN = extração do N mineral presente na camada

a) Cálculo de índice de unidade de CNR (CNRF):

$$CNRF = \exp (-0,693 \times (CNR - 25)) / 25 \quad (5)$$

b) Cálculo de G1:

$$G1 = TF \times MF \times CNRF \times RDECR(J) \quad (6)$$

Onde,

G1 = proporção de pool que decai em um dia

TF = fator temperatura

MF = fator água

CNRF = fator da composição do resíduo (C:N)

RDECR = índice constante

c) Cálculo de mineralização (GRNOM):

$$GRNOM = G1 \times FPOOL(L,JP) / FOM(L) \times FON(L) \quad (7)$$

Onde,

GRNOM = mineralização bruta de N associado com o decaimento

G1 = pool que decai em um dia

FPOOL(L,JP) = pool de FOM em cada camada, onde L =camada e JP é cada pool, carboidrato, celulose e lignina (JP=1,2,3)

FOM = matéria orgânica fresca

FON = movimento do N orgânico fresco

Mineralização da Fração Húmica

$$RHMIN = NHUM(L) \times DMINR \times TF \times MF^{(DMOD)} \quad (8)$$

Onde,

RHMIN = mineralização da fração húmica

NHUM = N contido dentro do humus

DMINR = constante ($8,3 \times 10^{-5}$)

TF = fator temperatura

MF = fator água

DMOD = modificação para predizer índices de mineralização para diferentes tipos de solo

DMOD = 2,0 → solo virgem

DMOD = 0,2 → profundidade onde o decaimento é muito lento

Nitrificação

1° cálculo: Fator de concentração de amônia no solo (SANC)

$$RHMIN = NHUM(L) \times DMINR \times TF \times MF^{(DMOD)} \\ SANC = 1,0 - \exp(-0,01363 \times SNH4(L)) \quad (9)$$

Onde,

SANC = fator de concentração de amônia no solo

SNH4 = concentração de amônia

SANC = 0 quando SNH4 < 1 ppm de amônia

SANC = 0,75 quando SNH4 = 100 ppm de amônia

2° cálculo: Potencial de nitrificação (RP2)

$$RP2 = CNI(L) \times \exp(2,302 \times ELNC) \quad (10)$$

Onde,

RP2 = potencial de nitrificação relativo para o dia (entre 0,01 e 1,0)

CNI = potencial de nitrificação biológica na camada

ELNC = limitações ambientais e capacidade de nitrificação

Denitrificação

1º cálculo: Estimativa de solubilidade do Carbono no solo (CW)

$$CW = (HUM(L) \times FAC(L)) \times 0,0031 + 24,5 + 0,4 \times FPOOL1(L,1) \quad (11)$$

Onde,

CW = solubilidade do carbono do solo

HUM = humus da matéria orgânica na camada

FAC = fator de conversão para densidade e espessura da camada

FPOOL1(L,1) = fração de carboidrato na matéria orgânica na camada

2º cálculo: Índice de denitrificação (DNRATE)

$$DNRATE = 6,0 \times 1,0E^{-0,5} \times CW \times NO3(L) \times FW \times FT \times DLAYR(L) \quad (12)$$

Onde,

DNRATE = índice de denitrificação

CW = solubilidade do C no solo

FW = fator água

FT = fator temperatura

DLAYR = espessura da camada

Movimento do Nitrato e Uréia

$$NOUT = SNO3(L) \times FLUX(L) / (SW(L) \times DLAYR(L) + FLUX(L)) \quad (13)$$

Onde,

NOUT = perda de nitrato de cada camada

FLUX(L) = volume de água movendo-se através de cada camada do perfil
(água escoada de cada camada)

SW X DLAYR = volume de água presente em cada camada

SNO3(L) = concentração de nitrato na camada

Concentração de Nitrogênio no Tecido Vegetal da Planta

a) Concentração Crítica de N = menor concentração de N na qual o crescimento é máximo.

b) Concentração Mínima de N = concentração de N abaixo da qual o crescimento cessa.

$$\begin{aligned} &1^{\circ} \text{ cálculo: Índice de deficiência de N (NFAC)} \\ &NFAC = 1,0 - (TCNP - TANC) / (TCNP - TMNC) \end{aligned} \quad (14)$$

Onde,

NFAC = índice de deficiência de N (g.N.g^{-1} peso seco do tecido da planta)

TCNP = concentração crítica de N (g.N.g^{-1} peso seco do tecido da planta)

TANC = concentração atual de N (g.N.g^{-1} peso seco do tecido da planta)

TMNC = concentração mínima de N (g.N.g^{-1} peso seco do tecido da planta)

Absorção de Nitrogênio

a) Demanda Deficiente: quantidade de N requerido para restaurar a concentração atual de N para a concentração crítica.

b) Demanda para novo crescimento:

$$\begin{aligned} &1^{\circ} \text{ cálculo: Demanda Deficiente máxima (TNDEM)} \\ &TNDEM = TOPWT \times (TCNP - TANC) \end{aligned} \quad (15)$$

Onde,

TNDEM = demanda deficiente máxima em kg.N.ha^{-1}

TOPWT = massa de brotos em $\text{kg.peso seco. ha}^{-1}$

TCNP = concentração crítica de N

TANC = concentração atual de N

$$2^{\circ} \text{ cálculo: Demanda de N pela raiz (RNDEM)}$$

$$RNDEM = RTWT \times (RCNP - RANC) \quad (16)$$

Onde,

RNDEM = demanda de N pela raiz (em kg.ha^{-1})

RTWT = biomassa radicular (em kg.ha^{-1})

RCNP = valor crítico de N na raiz (em kg.ha^{-1})

RANC = valor atual de N na raiz (em kg.ha^{-1})

OBS.: se $TANC > TCNP$, então a demanda é negativa, o que assegura que a absorção não continue

$$3^{\circ} \text{ cálculo: Demanda Total de N na planta (ANDEM)}$$

$$ANDEM = \text{demanda deficiente} + \text{demanda para novo crescimento} \quad (17)$$

Onde,

ANDEM = demanda total de N na planta

Fornecimento de Nitrogênio*1º cálculo: Fornecimento potencial de N para a cultura*

$$FNO3 = 1,0 - \exp(-0,03 \times NO3(L))$$

$$FNH4 = 1,0 - \exp(-0,03 \times (NH4(L) - 0,5)) \quad (18)$$

Onde,

FNO3 = fator de avaliação para nitrato

FNH4 = fator de avaliação para amônia

2º cálculo: Fator água no solo (para solo não inundado)

$$SMDFR = (SW(L) - LL(L)) / ESW(L) \quad (19)$$

Onde,

SMDFR = Fator água do solo (reduz a absorção potencial de N pela planta)

LL (L) = limite inferior de água no solo

SW (L) = conteúdo de água do solo

ESW (L) = camada de água do solo extraída

3º cálculo: Absorção Atual de Amônia (RNH4U(L)) e Nitrato (RNO3U(L))

$$RNO3U(L) = 0,008 \times SMDFR \times 2 \times DLAYR(L) \times 100 \times FNO3 \quad (20)$$

Onde,

RNO3U(L) = absorção atual de nitrato (kg.N.ha⁻¹)

DLAYR = espessura da camada

SMDFR = fator água do solo

FNO3 = fator de avaliação para nitrato

4º cálculo: Absorção Potencial de N de todo perfil

$$TRNU = RNO3U(L) + RNH4U(L) \quad (21)$$

Onde,

TRNU = absorção potencial de N de todo o perfil

RNO3U = absorção atual de nitrato *

RNH4U = absorção atual de amônia *

*em todas as camadas onde ocorrem raízes

5º cálculo: Se TRNU > ANDEM, então é calculado NUF

$$NUF = ANDEM / RNU \quad (22)$$

Onde,

ANDEM = demanda de N pela cultura

NUF = fator de absorção de N usado para reduzir a absorção de N a cada camada para o nível de demanda

-Quando demanda > fornecimento, então $NUF = 1,0$ (potencial de absorção não é reduzido)

-Quando fornecimento > demanda, então $NUF < 1,0$ (absorção de cada camada é reduzida)

Modelo Teórico Preliminar de Balanço de Nitrogênio para a Cana-de-Açúcar

Através do código fonte do modelo CERES foi possível a determinação de cada processo envolvido na sub-rotina CERES N de balanço de nitrogênio, e a partir desses processos foi possível a reconstrução do modelo adaptando-o a cana-de-açúcar (Fig. 5). Além disso foi possível a determinação de cada equação matemática envolvida nesses processos, conforme descritos na Tabela 1.

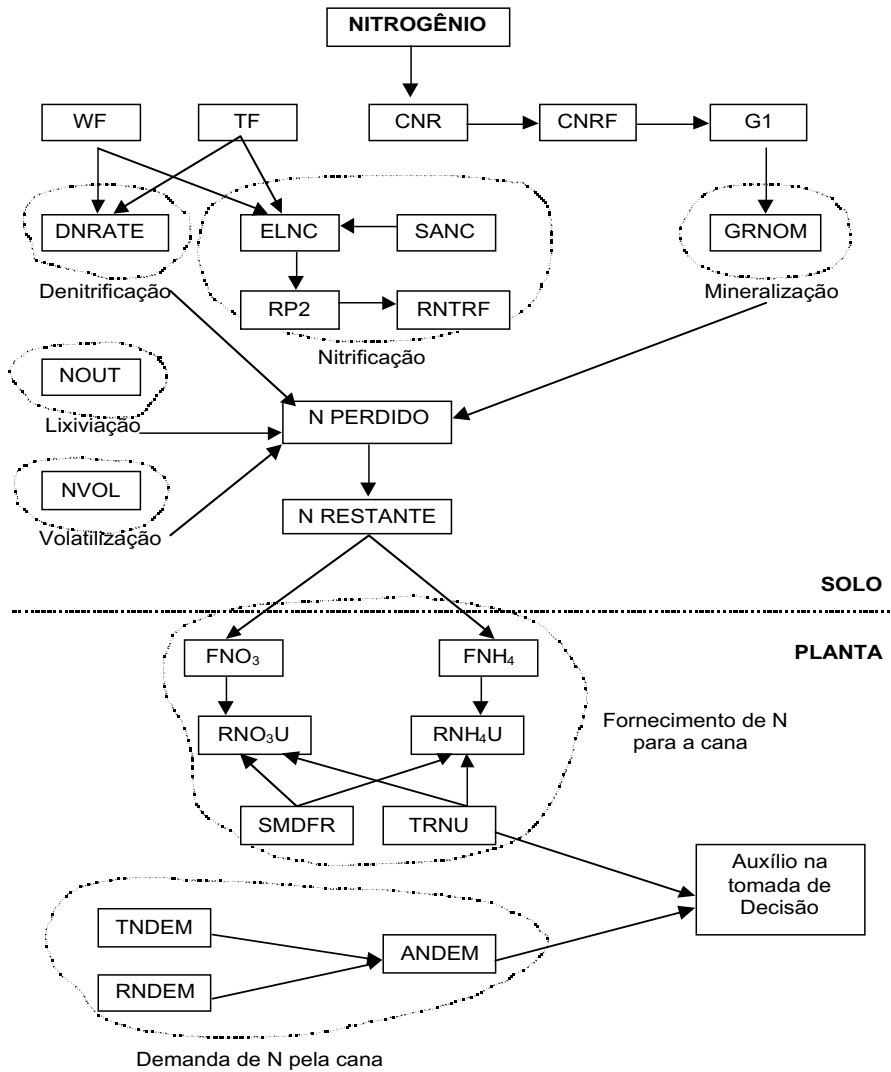


Fig. 5. Modelo preliminar de Balanço de Nitrogênio para a cana-de-açúcar adaptado do modelo CERES N.

Esse modelo preliminar de balanço de Nitrogênio para a cana-de-açúcar e para as condições edafoclimática brasileiras foi adaptado do modelo CERES N, modelo de balanço de Nitrogênio para culturas como o trigo, o milho, o arroz e a soja. Em cada compartimento deste modelo está inserida uma ou mais equações que irão quantificar o processo em questão, conforme pode ser observado na Tabela 1. Na próxima fase deste estudo, essas equações serão calibradas com dados reais, e o modelo será construído e rodado no software STELLA para posterior correções e novas alterações, até sua validação e inserção como uma sub-rotina de Balanço de Nitrogênio no modelo de crescimento da cana-de-açúcar, CANEGRO.

Tabela 1. Definições das equações do Modelo Preliminar de Balanço de N para cana-de-açúcar.

Variável	Definição	Equação
Nitrogênio	Concentração de N aplicada ao solo em forma de fertilizante nitrogenado	
CNR	Efeito da Composição do Resíduo	$CNR = (0,4 \times FOM(L)) / (FON(L) + TOTN)$
CNRF	Cálculo do índice de unidade de CNR	$CNRF = \exp(-0,693 \times (CNR - 25)) / 25$
G1	Proporção de N que decai em um dia	$G1 = TF \times MF \times CNRF \times RDEC(R)$
GRNOM	Cálculo da Mineralização bruta de N	$GRNOM = G1 \times FPOOL(L,JP) / FOM(L) \times FON(L)$
WF	Fator Água	$MF = 1,0 - (SW(L) - DUL(L)) / (SAT(L) - DUL(L)) \times 0,5$
TF	Fator Temperatura	$TF = (ST(L) - 0,5) / 30,0$
DNRATE	Índice de Denitrificação	$DNRATE = 6,0 \times 1,0E^{-0,5} \times CW \times NO3(L) \times FW \times FT \times DLAYR(L)$
SANC	Fator de concentração de amônia no solo	$SANC = 1,0 - \exp(-0,01363 \times SNH4(L))$
ELNC	Limitações ambientais e capacidade de nitrificação	$ELNC = AMIN1(TF, WFD, SANC)$
RP2	Potencial de nitrificação	$RP2 = CN(L) \times \exp(2,302 \times ELNC)$
RNTRF	Índice de Nitrificação diária	$RNTRF = AMIN1(B, SNH4(L))$
NOUT	Perda de Nitrato de cada camada	$NOUT = SNO3(L) \times FLUX(L) / (SW(L) \times DLAYR(L) + FLUX(L))$
NVOL	Volatilização da Amônia	
NPERD	N perdido	$NPERD = GRNOM + (DNRATE \times N \text{ do solo}) + NOUT + NVOL$
NREST	N restante	$NREST = (N \text{ palhada} + N \text{ solo} + N \text{ fertilizante}) - NPERD$
FNO ₃	Fator de avaliação para nitrato	$FNO3 = 1,0 - \exp(-0,03 \times NO3(L))$
FNH ₄	Fator de avaliação para amônia	$FNH4 = 1,0 - \exp(-0,03 \times (NH4(L) - 0,5))$
RNO ₃ U	Absorção atual de Nitrato	$RNO3U(L) = 0,008 \times SMDFR \times 2 \times DLAYR(L) \times 100 \times FNO3$
RNH ₄ U	Absorção atual de Amônia	$RNH4U(L) = 0,008 \times SMDFR \times 2 \times DLAYR(L) \times 100 \times FNH4$
SMDFR	Fator Água no solo	$SMDFR = (SW(L) - LL(L)) / ESW(L)$
TRNU	Absorção potencial de N de todo o perfil	$TRNU = RNO3U(L) + RNH4U(L)$
TNDEM	Demanda deficiente máxima	$TNDEM = TOPWT \times (TCNP - TANC)$
RNDEM	Demanda de N pela raiz	$RNDEM = RTWT \times (RCNP - RANC)$
ANDEM	Demanda total de N na planta	$ANDEM = \text{demanda deficiente} + \text{demanda para novo crescimento}$

Conclusões

Com o decreto estadual que proíbe a queimada da cana antes da colheita, novos estudos estão se tornando necessários para definição do melhor manejo a ser adotado, uma vez que a colheita passa a ser quase que obrigatoriamente feita por máquinas, depositando a palhada no solo, o que irá provocar alterações dos processos que ocorrem no solo, assim como a disponibilidade e o fornecimento de nutrientes para a cultura. Esses estudos irão possibilitar que o produtor obtenha maior ganho em produtividade, economize dinheiro utilizando fertilizantes em quantidades ideais para suas condições, e principalmente, diminua os impactos ambientais causados pela fertilização acima do necessário e pelo manejo incorreto da cultura.

A modelagem matemática é uma ferramenta muito importante no auxílio a tomada de decisões, pois simula produção e crescimento das culturas em diversas situações possíveis, sem gasto de dinheiro, tempo e trabalho. Com o resultado dessas simulações, é possível analisar e decidir o melhor manejo a ser adotado, antes de começar o cultivo, a fim de atender os objetivos na realidade do produtor em determinada região.

O Modelo CERES N, do software DSSAT, que simula o balanço de nitrogênio de culturas como o milho, milheto, soja, arroz e trigo, leva em consideração os processos que sofre o nitrogênio ao entrar no sistema solo-planta, como a nitrificação, denitrificação, imobilização, mineralização, lixiviação e erosão, os quais interferem diretamente na absorção de nitrogênio pela cultura e assim, no seu crescimento. Porém, esse modelo exige um número elevado e detalhado de variáveis de entrada, tornando seu uso restrito e complicado.

O Modelo CERES N, após adaptado, pode, teoricamente, ser utilizado para simular o balanço de nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar, pois foi incluído na parte do modelo de transformações do nitrogênio no solo, a camada de palhada, foi retirado a parte de enchimento de grãos, e serão alterados os valores dos parâmetros, como por exemplo taxa de absorção da planta, através do processo de calibração, na segunda fase desse estudo.

Assim, esse modelo preliminar buscou simplificar o modelo original, adaptá-lo a cana-de-açúcar e as condições brasileiras, e após validado, espera-se que este seja de fácil acesso, entendimento, e uso de produtores, técnicos e pesquisadores da área.

Referências Bibliográficas

CANTARELLA, H. Adubação nitrogenada em sistema de cana crua. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 16, p. 21-2, 1998.

CRASWELL, E. T.; GODWIN, D. C. The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals grown in different climates. In: TINKER, P. B.; LAUCHLI, A. (Ed.). **Advances in plant nutrition**. New York: Praeger Scientific, 1984. v.1, 298 p.

DENMEAD, O. T.; SIMPSON, J. R.; FRENY, J. R. The direct measurement of ammonia emission after injection of anhydrous ammonia. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, p. 1001-1004, 1977.

GODWIN, D. C.; SINGH, U. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1998. p. 55-77.

INMAN-BAMBER, N. G. A growth model for sugar-cane based on a simple carbon balance and the CERES-maize water balance. **South African Journal Plant and Soil**, v. 8, p. 93-99, 1991.

MAGRO, J. A. Sistema cana crua: perspectivas de viabilidade. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 16, n. 4, p. 31-32, 1998.

MATIOLI, C. S.; FRIZZONE, J. A.; PERES, F. C. Irrigação suplementar da cana-de-açúcar: modelo de análise de decisão para a região norte do Estado de São Paulo. **STAB: Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n.2, p. 42-45, 1998.

NG KEE KWONG, K. F.; DEVILLE, J.; CAVALOT, P. C.; RIVIERE, V. Value of cane trash in nitrogen nutrition of sugarcane. **Plant and Soil**, v. 102, p. 79-83, 1987.

PENNING DE VRIES, F. W. T.; LAAR, H. H. van (Ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. 308 p. (Simulation Monographs,

ROLSTON, D. E.; SHARPLEY, A. N.; TOY, D. W.; HOFFMAN, D. L.; BROADBENT, F. E. **Denitrification as affected by irrigation frequency of a field soil**. Ada: EPA, 1980. (EPA-600/2-80-06)

SELIGMAN, N. C.; KEULEN, H. P. van. PAPRAN: a simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. In: FRISSEL, M. J.; VEEN, J. A. van (Ed.). **Simulation of nitrogen behaviour of soil plant system**. Wageningen: Pudoc, 1981. p. 192-221.

TORRES, J. S.; VILLEGAS, F. Green cane management under heavy trash conditions. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 22., 1995, Cartagena. **Proceedings**. Cali: Tecnicanã, 1996.

TRIVELIN, P. C. O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: três casos estudados com uso do traçador ^{15}N** . 2000. 143 f. Tese (Livre-Docência) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.

TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. **DSSAT version 3**. Honolulu: University of Hawaii, 1994. 163 p.

URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; OLIVEIRA, O. C.; LIMA, E.; GUIMARÃES, D. H. V. **Importância de não queimar palha na cultura de cana-de-açúcar**. Seropédica: Embrapa-CNPBS, 1991. 12 p. (Embrapa-CNPBS. Comunicado Técnico, 5).

WOOD, A.W. Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in North Queensland. **Soil & Tillage Research**, v. 20, p. 69-85, 1991.

YADAY, D. V.; TODI, S.; SRIVASTAVA, A. K. Recycling of nutrients in trash with N for higher cane yield. **Biological Wastes**, v. 20, p. 133-141, 1987.



Informática Agropecuária